

# 覆盖对雷竹细根碳氮磷化学计量特征的影响

刘思泽<sup>1,2</sup>, 张小国<sup>4</sup>, 陈露蔓<sup>1,2</sup>, 高卿容<sup>1,2</sup>, 陈崑崙<sup>1,2</sup>, 范 川<sup>1,2,3</sup>, 李贤伟<sup>1,2,3\*</sup>

(1 四川农业大学 林学院, 成都 611130; 2 四川农业大学 长江上游森林资源保育与生态安全国家林业和草原局重点实验室, 成都 611130; 3 长江上游林业生态工程四川省重点实验室, 成都 611130; 4 四川省林业勘察设计院, 成都 611181)

**摘 要:** 为了探讨不同覆盖年限下雷竹(*Phyllostachys praecox*)细根碳(C)、氮(N)、磷(P)化学计量特征, 明确雷竹细根养分动态对覆盖经营措施的响应, 为实现雷竹笋用林地养分平衡和高效经济效益提供理论依据。该研究以雅安市雨城区草坝镇已开展连续 4 年覆盖(LM)、连续 2 年覆盖(SM)、不覆盖(CK)3 种不同覆盖年限下的笋用雷竹林为研究对象, 覆盖材料为谷壳(上层保温层)和稻草(下层增温层), 在每个标准地内“S”形布设采样点并使用根系取样器对 0~30 cm 土层细根于各季节取样, 分析计算不同覆盖年限下雷竹细根 C、N、P 的化学计量特征。结果显示: (1) 覆盖年限和季节均能显著影响雷竹细根 C、N、P 含量及其化学计量比, 与季节相比覆盖年限是影响雷竹细根 C、N、P 含量及其化学计量比的更关键因素。(2) SM 能增高细根养分含量, 而 LM 会降低细根养分含量, 覆盖影响细根 C、N 养分含量的季节变化规律, 而不影响 P 的季节变化规律。(3) 3 种处理的 C/N、C/P、N/P 均分别具有相同的季节变化规律, SM 降低雷竹细根各季节和年平均 C/N, 而 LM 增加雷竹细根各季节和年平均 C/N, SM 和 LM 均能降低雷竹细根各季节和年平均 C/P 和 N/P, LM 较 SM 各季节和年平均 C/P 增大, 但两者各季节 N/P 差异均不显著( $P > 0.05$ )。(4) 相关性分析显示, 覆盖年限增长会使雷竹细根 C、N、P 及其化学计量比之间形成更为复杂的显著相关关系。研究表明, 长期连续覆盖会降低雷竹细根 C、N、P 含量, 同时造成细根养分失衡, 雷竹林的覆盖经营需降低连续覆盖时间, 采取短期覆盖经营措施, 给细根休养恢复的时间, 从而达到雷竹笋用林可持续经营目的。

**关键词:** 雷竹; 覆盖; 细根; 碳; 氮; 磷; 化学计量

**中图分类号:** Q944.3; S718 **文献标志码:** A

## Effect of Mulching Management on C, N, P Stoichiometry Characteristics of Fine Roots of *Phyllostachys praecox*

LIU Size<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaoguo<sup>4</sup>, CHEN Luman<sup>1,2</sup>, GAO Qingrong<sup>1,2</sup>,  
CHEN Qinjin<sup>1,2</sup>, FAN Chuan<sup>1,2,3</sup>, LI Xianwei<sup>1,2,3\*</sup>

(1 College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2 Key Laboratory of State Forestry Administration for Forest Resources Conservation and Ecological Security in the Upper Reaches of the Yangtze River [Sichuan Agricultural University], Chengdu 611130, China; 3 Forestry Ecological Engineering in the Upper Reaches of Yangtze River Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611130, China; 4 Sichuan Forestry Inventory and Planning Institute, Chengdu 611181, China)

**Abstract:** This study explored the C, N, P stoichiometry characteristics in fine roots of *Phyllostachys*

**收稿日期:** 2019-08-29; **修改稿收到日期:** 2019-11-13

**基金项目:** 四川省市场监督管理局四川省地方标准(DB51/T 2574-2019); 雅安市林业局项目(003H0600); 四川农业大学大学生科研兴趣培养计划(191113233)

**作者简介:** 刘思泽(1990—), 男, 在读博士研究生, 主要从事森林培育学研究。E-mail: liu\_size@qq.com

\* 通信作者: 李贤伟, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事森林培育学研究。E-mail: lxw@sicau.edu.cn

*praecox* with different mulching years, to understand the response of fine root nutrient dynamics to mulching management, and to provide a theoretical basis about reasonable development of coverage management to achieve efficient and sustainable economic benefits. Investigation was carried out in the *P. praecox* plantation with different mulching years, include long-term mulching (LM, continuous coverage for 4 years), short-term mulching (SM, continuous coverage for 2 years) and not cover (CK), located in Caoba Town, Yucheng District, Ya'an City. The mulching materials are rice husk (insulation layer) and rice straw (warming layer). In mid-late of July, October 2017 and January, April 2018, s-shaped points were selected in each sample plot. Fine root samples were collected at 0–30 cm depth and the C, N, P stoichiometry characteristics of fine roots were determined. This results showed that: (1) the effects of different mulching years on fine root C content, N content, P content, C/N ratio, C/P ratio and N/P ratio of *P. praecox* were greater that of different seasons. Compared with seasons, mulching years were more important factors for C content, N content, P content and their stoichiometric ratios. (2) Short-term mulching could increase the nutrient contents of fine roots, while long-term mulching could reduce the nutrient contents of fine roots, and mulching could affect the seasonal variation of C and N nutrient contents in fine roots, but not P. (3) C/N, C/P and N/P ratios of the three treatments had the same seasonal variation law. Short-term mulching reduced the average annual and each season C/N ratios in fine roots, while long-term mulching increased the average annual and each season C/N ratios in fine roots. Mulching could reduce the average annual and each season C/P ratio in fine roots, but the long-term mulching's C/P ratio was higher than that with short-term mulching. Mulching could reduce the average annual and each season N/P ratios in fine roots. There was no significant difference between long-term mulching and short-term mulching in each season N/P ratios of fine roots ( $P > 0.05$ ). (4) The correlation analysis showed that the increase of mulching years would lead to a more complex significant correlation between C, N, P and their stoichiometric ratios. This results indicate that long-term continuous mulching can reduce the C, N and P contents in fine roots of *P. praecox*, and cause the imbalance of nutrients of fine roots. The mulching management of *P. praecox* plantations needs to reduce the continuous mulching time, adopt short-term mulching management measures, and give the time for fine roots to recover, so as to achieve the goal of sustainable management of *P. praecox* plantations.

**Key words:** *Phyllostachys praecox*; mulching; fine root; carbon; nitrogen; phosphorus; stoichiometry

细根(直径 $\leq 2$  mm)是森林地下生态过程的重要组成部分,其在植物生态生理功能发挥、陆地生态系统能量流动及物质循环中起到重要作用<sup>[1]</sup>。细根生物量在林分根系总生物量中占比较低(3%~30%),却具有极大的吸收表面积,是植物吸收水分和养分的主要器官<sup>[2-4]</sup>。细根是其所在生态系统中最活跃的组分之一,其生产和周转与生态系统物质循环和能量流动紧密相关。碳(C)是组成植物体干物质最主要的元素,氮(N)、磷(P)是植物生长的主要限制性养分,三者生态系统物质和能量循环以及多元素平衡过程中共同发挥着重要作用<sup>[5-7]</sup>。当前生态化学计量学(ecological stoichiometry)研究主要关注 C、N、P 之间的耦合关系,其化学计量特征用于研究植物器官内 3 种元素的动态及相互关系,在植物体对环境响应、植物体器官相对生长速率、限制性元素诊断等研究领域中被广泛应用<sup>[8-9]</sup>。C/N 和 C/P 指标在一定程度上可反映植物的养分利用效率,其能够指示 C、N、P 的利用、储存和运转,特别

是在时间尺度上,其能够积极响应植物的生长节律。N/P 指标已被广泛用于指示植物体所受元素限制,不同种类和不同地域植被在其特定生长阶段都具有其一定阈值,这一阈值能够揭示 N、P 元素的相对限制作用<sup>[10]</sup>。

雷竹(*Phyllostachys praecox*)是禾本科刚竹属植物,是中国小径竹中优良的笋用竹种,其具有笋期长、笋品优和易管理等特点<sup>[11]</sup>。四川自 2000 年引种以来,栽培面积迅速扩大,特别是近年来成为部分地区攻坚扶贫的富农产业。林地覆盖作为促笋早出、实现更大经济效益的重要手段,现在已被广泛用于雷竹笋用林生产经营中,但伴随经济效益增加的同时,长期连续覆盖造成林地退化,笋产量减少,导致这些变化的原因与雷竹林地及雷竹自身养分结构与平衡出现变化有关。目前对于雷竹林地覆盖研究主要集中于土壤理化性质、植物体内激素、土壤微生物、立竹结构等<sup>[12-15]</sup>,而在雷竹生态化学计量学方面的研究主要关注地上部分,对于雷竹地下部分特

别是细根在空间和时间尺度上的化学计量学研究甚少,而覆盖措施下雷竹细根 C、N、P 化学计量特征的研究更未见报道<sup>[16-18]</sup>。为此,本研究在雨城区草坝镇选取生长情况相似、龄级结构合理、竹林密度和立地条件基本一致的雷竹林进行连续 4 年(2013 年开始)和连续 2 年(2015 年开始)覆盖处理,通过研究不同覆盖年限对雷竹细根 C、N、P 含量及其化学计量特征的影响,探索合理的覆盖方案,为雷竹笋用林培育及提质增效提供一定的参考依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域与标准地概况

研究区位于雅安市雨城区草坝镇(E102°51′~103°12′,N29°57′~30°14′),该地区风力小,年降水量为 1 000~1 800 mm;处于成都平原西南部,属亚热带湿润季风气候区;海拔 535 m,日照为 800~1 000 h;年相对湿度 77%~83%,湿度较大,年蒸发量 924~1 362 mm;全年 1 月最冷,月平均气温 6.1℃;7 月最热,月平均气温 25.3℃。

试验标准地设于草坝镇广华村山民雷竹种植专业合作社集约化经营的笋用雷竹林中,其林分内部密度和龄级结构一致,密度为 12 000 株/hm<sup>2</sup>,竹龄为 1~5 a,胸径为 2.5~5.0 cm。由于长期频繁的经营活动,林下鲜有其他植被分布。雷竹林分土壤为耕作土,2013 年所测得的理化性质本底值见表 1。2013 年在有代表性集约经营的地段设置标准地,按照 4 年覆盖(LM)、2 年覆盖(SM)、不覆盖(对照 CK)3 种模式选取 20 m×20 m 的标准地,各模式重复 3 次,共计 9 块。LM 处理于 2013 年冬季开始连

表 1 雷竹林分土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of experiment soil

指标 Index	数值 Value
pH	4.6
质量含水量 Mass water content/(g/kg)	246.00
最大持水量 Maximum water holding capacity/(g/kg)	361.00
有机质 Organic matter/(g/kg)	63.78
全氮 Total N/(g/kg)	2.30
全磷 Total P/(g/kg)	1.73
全钾 Total K/(g/kg)	21.43
碱解氮 Avail. N/(mg/kg)	259.40
有效磷 Avail. P/(mg/kg)	89.23
速效钾 Avail. K/(mg/kg)	59.80

续 4 年覆盖,SM 处理于 2015 年冬季开始连续 2 年覆盖。覆盖材料为谷壳 20 cm(上层保温层)和稻草 20 cm(下层增温层),覆盖于头年 11 月进行,待增温层覆盖完成 3~5 d 后,增温层自然压实再进行保温层覆盖,次年 4 月移除覆盖物。

### 1.2 样品采集与处理

前期雷竹竹鞭分布调查的结果表明,雷竹鞭根主要分布于 0~30 cm 土层中。于 2017 年 7 月(夏)、10 月(秋)及 2018 年 1 月(冬)、4 月(春)每月中下旬在 9 个标准地中用植物根系取样器(20 cm×20 cm×10 cm)采用“S”形布设 5 点采样,去除表层凋落物后对 0~30 cm 土壤取样,取出的土块样品放入 2~3℃冷藏箱中带回实验室处理。在整个室外取样过程中,要尽量保证根系构型的完整性,避免损伤根系末端最细小的细根。

### 1.3 测定方法

在实验室内,将带回的土样用 2~3℃的去离子水浸泡与漂洗,使用 100 目的土壤筛进行反复筛检,洗除根系上的附着物。根据细根的颜色(死细根发黑)、弹性(死细根弹性差)、皮层与中柱剥离难易程度(死细根皮层易剥离)等特征从筛检出的雷竹根系中拣出直径≤2 mm 的雷竹活细根<sup>[19]</sup>。将各编号后的细根样品放于 80℃的烘箱中烘干至恒重,用微型植物粉碎机研磨后过筛,装入样品袋备用。全 C 含量采用重铬酸钾氧化外加加热法测定,全 N 和全 P 均先采用硫酸-高氯酸消煮,然后全 N 采用半微量凯氏法,全 P 采用钼锑抗比色法。

### 1.4 数据处理与统计分析

使用 Excel 2013 进行数据前期处理,统计分析和绘图分别在 SPSS 20.0 和 SigmaPlot 12.0 中完成。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Duncan 多重比较分别分析不同处理不同季节间细根 C 含量、N 含量、P 含量、C/N、C/P 和 N/P 的差异显著性;采用双因素方差分析(Two-way ANOVA)分析季节、覆盖年限及其两者交互效应对细根 C、N、P 含量及其化学计量比的影响;采用 Pearson 相关性分析检验细根 C、N、P 含量及其化学计量比各指标之间的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同覆盖处理雷竹细根 C、N、P 含量季节动态

由表 2 可以得出,不同季节、不同覆盖年限因素及其交互作用对雷竹细根 C、N、P 含量的影响均极显著( $P < 0.01$ )。通过对比不同季节、覆盖年限及

两者交互作用影响因素的 F 值,在雷竹细根 C、N 和 P 含量指标上,覆盖年限因素的影响强于季节因素,两者交互作用影响最小。

图 1 显示 0~30 cm 土层中,CK 雷竹细根 C 含量季节变化范围在 333.19~351.46 g/kg 之间;短期覆盖 SM 处理雷竹细根 C 含量变化范围在 338.00~366.99 g/kg 之间;长期覆盖 LM 处理雷竹细根 C 含量变化范围在 321.24~348.46 g/kg 之间。每个季节 3 种处理细根 C 含量大小关系均表现为:SM > CK > LM,特别是春季 SM 处理细根 C 含量显著高于 CK 和 LM( $P < 0.05$ )。3 种处理夏秋冬 3 季细根 C 含量变化趋势较为一致,主要差

异表现在春季,短期覆盖 SM 处理春季细根 C 含量较冬季显著增大( $P < 0.05$ ),长期覆盖 LM 处理春季细根 C 含量较冬季增大 6.68 g/kg,但两季节细根 C 含量差异不显著( $P > 0.05$ ),其中短期覆盖 SM 处理春季 C 含量甚至为 4 个季节中最大。

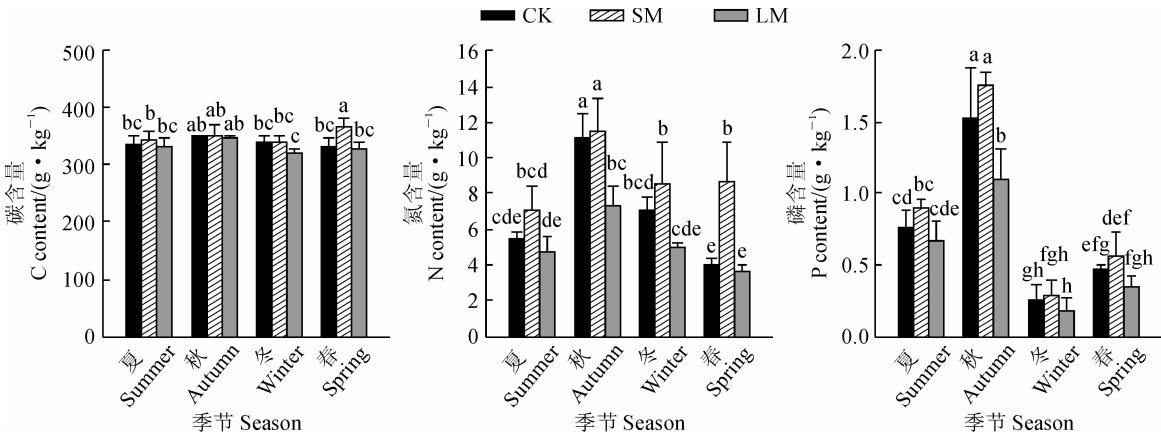
CK 雷竹细根 N 含量季节变化范围在 4.00~11.07 g/kg 之间;短期覆盖 SM 处理雷竹细根 N 含量变化范围在 7.05~11.45 g/kg 之间;长期覆盖 LM 处理雷竹细根 N 含量变化范围在 3.66~7.37 g/kg 之间。每个季节 3 种处理细根 N 含量大小关系均表现为:SM > CK > LM,除夏季外,SM 处理其他 3 季节细根 N 含量均显著大于 LM( $P < 0.05$ )。

表 2 雷竹细根 C、N、P 含量的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA about the effect of variation from different seasons and mulching years on C, N, and P contents in fine roots of *P. praecox*

指标 Index/(g/kg)	影响因素 Influence factor	自由度 df	离差平方和 SS	均方 MS	F
C	季节 Season(S)	3	1 522.48	507.49	27.282**
	覆盖年限 Mulching years(M)	2	1 823.42	911.71	49.012**
	季节×覆盖年限(S×M)	6	1 709.53	284.92	15.317**
N	季节 Season(S)	3	114.15	38.05	81.323**
	覆盖年限 Mulching years(M)	2	84.18	42.09	89.958**
	季节×覆盖年限(S×M)	6	21.34	3.56	7.600**
P	季节 Season(S)	3	3.87	1.29	189.97**
	覆盖年限 Mulching years(M)	2	3.42	1.71	252.284**
	季节×覆盖年限(S×M)	6	1.33	0.22	32.593**

注: \* 表示差异性显著( $P < 0.05$ ); \*\* 表示差异性极显著( $P < 0.01$ );下同  
Note: \* indicates significant differences at 0.05 level, \*\* indicate significant differences at 0.01 level; The same as below



CK. 不覆盖(对照);SM. 连续 2 年覆盖;LM. 连续 4 年覆盖;不同小写字母表示同一元素差异显著( $P < 0.05$ )

图 1 不同覆盖处理雷竹细根 C、N、P 含量季节动态

CK. Not cover ; LM. Long-term mulching (continuous coverage for 4 years); SM. Short-term mulching (continuous coverage for 2 years); In each seasonal dynamic picture, different normal letters represent significant difference ( $P < 0.05$ )

Fig. 1 Seasonal dynamics of C, N, and P contents in fine roots of *P. praecox* with different mulching years

LM 处理细根 N 含量季节变化规律与 CK 一致,秋季细根 N 含量最高,春季细根 N 含量最低;而 SM 处理春季细根 N 含量较冬季增加 0.17 g/kg,但两季节细根 N 含量差异不显著( $P > 0.05$ )。

CK 雷竹细根 P 含量季节变化范围在 0.26~1.52 g/kg 之间;短期覆盖 SM 处理雷竹细根 P 含量变化范围在 0.29~1.75 g/kg 之间;长期覆盖 LM 处理雷竹细根 P 含量变化范围在 0.18~1.10 g/kg 之间。每个季节 3 种处理 N 含量大小关系均表现为:SM > CK > LM,除秋季 LM 处理细根 P 含量显著低于 CK 和 SM 处理外( $P < 0.05$ ),其他各季节 3 种处理细根 P 含量差异均不显著( $P > 0.05$ )。3 种处理细根 P 含量季节变化规律一致,秋季细根 P 含量最高,冬季细根 P 含量最低。

2.2 不同覆盖处理雷竹细根 C : N : P 化学计量比特征

表 3 表明,雷竹细根 C : N : P 化学计量比受不同季节、不同覆盖年限因素及其交互作用影响程度各不相同。雷竹细根 C/N 受季节和覆盖年限的影响均极为显著( $P < 0.01$ );C/P、N/P 受季节的影响达到显著( $P < 0.05$ ),受覆盖年限的影响极为显著( $P < 0.01$ )。季节和覆盖年限的交互作用对 C/N 的影响达到了极显著水平( $P < 0.01$ ),对 C/P、N/P 均无显著影响( $P > 0.05$ )。总之,通过对比不同季节、覆盖年限及两者交互作用影响因素的 F 值,在雷竹细根 C/N、C/P、N/P 等指标上,覆盖年限因素的影响强于季节因素,而两者交互作用影响最小。

由表 4 可以看出 3 种处理 C/N 按夏秋冬春季顺序均表现出先减小后增大的变化规律,C/P、

N/P 均表现出先减小后增大再减小的变化规律。CK 和 LM 处理 C/N 最大值出现在春季分别为 83.37、89.68,而 SM 处理 C/N 最大值出现在夏季为 48.70,短期覆盖 SM 处理降低了各季节 C/N,其 C/N 均低于 CK,除秋季外,其他 3 季节两者差异均显著( $P < 0.05$ ),长期覆盖 LM 处理反而增高了各季节 C/N,其 C/N 均高于 CK,其中秋、冬季差异均显著( $P < 0.05$ );CK、SM 和 LM 处理 C/P 最大值均出现在冬季分别为 5 680.28、1 165.52 和 1 818.36,短期覆盖 SM 处理和长期覆盖 LM 处理各季节 C/P 均显著低于 CK( $P < 0.05$ ),SM 处理各季节 C/P 均低于 LM 处理,其中夏、秋季差异显著( $P < 0.05$ ),总体来看,覆盖措施降低了雷竹 C/P,但随覆盖时间增加,C/P 会相应增高;CK、SM 和 LM 处理 N/P 最大值均出现在冬季,分别为 117.50、29.40 和 27.98,SM 处理和 LM 处理各季节 N/P 均显著低于 CK( $P < 0.05$ ),LM 处理各季节 N/P 均低于 SM 处理,但 2 种处理各季节 N/P 差异均不显著( $P > 0.05$ )。

2.3 雷竹细根 C、N、P 含量及其计量比的相关性分析

从表 5~7 可以看出,CK 雷竹细根 C 含量与 N 含量呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ),C 含量和 P 含量、N 含量和 P 含量均无显著相关关系( $P > 0.05$ ),C/P 与 N/P 呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ );SM 处理雷竹细根 C、N、P 含量两两之间均无显著相关关系( $P > 0.05$ ),C/P 与 N/P 呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ );LM 处理雷竹细根 C 含量与 N 含量呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ),C 含量

表 3 雷竹细根 C : N : P 化学计量比的双因素方差分析  
Table 3 Two-way ANOVA about the effect of variation from different seasons and mulching years on C : N : P stoichiometry in fine roots of *P. praecox*

指标 Index	影响因素 Influence factor	自由度 df	离差平方和 SS	均方 MS	F
C/N	季节 Season(S)	3	6 023.28	2 007.76	61.356**
	覆盖年限 Mulching years(M)	2	4 418.14	2 209.07	67.507**
	季节×覆盖年限(S×M)	6	1 484.46	247.41	7.561**
C/P	季节 Season(S)	3	31 626 027.24	10 542 009.08	4.211*
	覆盖年限 Mulching years(M)	2	124 586 880.30	62 293 440.15	24.883**
	季节×覆盖年限(S×M)	6	20 236 638.53	3 372 773.09	1.347
N/P	季节 Season(S)	3	8 901.90	2 967.30	5.179*
	覆盖年限 Mulching years(M)	2	39 877.88	19 938.94	34.800**
	季节×覆盖年限(S×M)	6	2 829.56	471.59	0.823

表 4 雷竹细根 C : N : P 化学计量比(平均值±标准差)  
Table 4 C : N : P stoichiometry in fine roots of *P. praecox* (Mean±SD)

覆盖处理 Mulching treatment	季节 Season	碳氮比 C/N	碳磷比 C/P	氮磷比 N/P
CK	夏季 Summer	61.06±6.01b	3 261.84±201.55b	53.42±3.65b
	秋季 Autumn	31.76±2.45e	1 270.34±154.12c	40.00±2.11c
	冬季 Winter	48.34±3.64c	5 680.28±487.32a	117.50±8.21a
	春季 Spring	83.37±6.84a	4 997.80±449.10a	59.95±2.98b
	平均 Mean	56.13±4.42	3 802.57±184.22	67.72±3.14
SM	夏季 Summer	48.70±2.03c	379.91±38.69f	7.80±0.49f
	秋季 Autumn	30.82±2.22e	201.34±18.06g	6.53±0.37g
	冬季 Winter	39.64±2.84d	1 165.52±108.94c	29.40±1.21d
	春季 Spring	42.22±3.03cd	651.47±53.47de	15.43±0.98e
	平均 Mean	40.35±1.94	599.56±41.11	14.79±0.73
LM	夏季 Summer	69.78±5.88b	500.99±47.94e	7.18±0.70f
	秋季 Autumn	47.30±3.66c	317.74±25.78f	6.42±0.34g
	冬季 Winter	64.99±6.34b	1 818.36±147.96c	27.98±1.14d
	春季 Spring	89.68±7.90a	928.08±74.22d	10.35±0.11e
	平均 Mean	67.94±5.96	891.29±65.94	12.98±0.78

注:同一列数据后的小写字母不同表示两者间差异显著( $P < 0.05$ )  
Note: Values followed by different normal letters in a column are significantly different between the two at 0.05 level

表 5 CK 雷竹细根 C、N、P 含量及其计量比的相关分析  
Table 5 Correlation analysis of C, N, and P contents and their ratios in fine roots of *P. praecox* treated with CK

参数 Parameter	C	N	P	C/N	C/P	N/P
C	—	0.638 *	0.537	—	—	−0.227
N	0.638 *	—	0.546	—	−0.459	—
P	0.537	0.546	—	−0.486	—	—
C/N	—	—	−0.486	—	0.376	0.065
C/P	—	−0.469	—	0.376	—	0.860 * *
N/P	−0.227	—	—	0.065	0.860 * *	—

注: \* 表示显著相关( $P < 0.05$ ); \* \* 表示极显著相关( $P < 0.01$ );下同  
Note: \* indicates significant correlation at 0.05 level, \* \* indicate significant correlation at 0.01 level; The same as below

表 6 SM 处理雷竹细根 C、N、P 含量及其计量比的相关分析  
Table 6 Correlation analysis of C, N, and P contents and their ratios in fine roots of *P. praecox* treated with SM

参数 Parameter	C	N	P	C/N	C/P	N/P
C	—	0.434	0.173	—	—	−0.273
N	0.434	—	0.573	—	−0.438	—
P	0.173	0.573	—	−0.538	—	—
C/N	—	—	−0.538	—	0.380	0.109
C/P	—	−0.438	—	0.380	—	0.940 * *
N/P	−0.273	—	—	0.109	0.940 * *	—

表 7 LM 处理雷竹细根 C、N、P 含量及其计量比的相关分析

Table 7 Correlation analysis of C, N, and P contents and their ratios in fine roots of *P. praecox* treated with LM

参数 Parameter	C	N	P	C/N	C/P	N/P
C	—	0.661 *	0.816 * *	—	—	—0.603 *
N	0.661 *	—	0.829 * *	—	—0.361	—
P	0.816 * *	0.829 * *	—	—0.617 *	—	—
C/N	—	—	—0.617 *	—	0.184	0.019
C/P	—	—0.361	—	0.184	—	0.985 * *
N/P	—0.603 *	—	—	0.019	0.985 * *	—

与 P 含量呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),N 含量与 P 含量呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),C 含量与 N/P 呈显著负相关关系( $P < 0.05$ ),P 含量与 C/N 呈显著负相关关系( $P < 0.05$ ),C/P 和 N/P 呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ )。

3 讨 论

3.1 季节和覆盖年限对雷竹细根 C、N、P 含量及其化学计量比的整体变异的影响

季节因素对雷竹细根 C、N、P 含量及其化学计量比均具有显著影响( $P < 0.05$ ),这反映出植物物候期特性对于植物体内养分平衡具有深刻意义。覆盖年限对 C、N、P 含量及其化学计量比均表现出极显著影响( $P < 0.01$ ),且对雷竹细根 C 含量、N 含量、P 含量、C/N、C/P、N/P 的影响大于季节因素,说明覆盖的确能够显著地影响雷竹生长过程中细根养分的含量及其平衡。SM 处理下细根 C、N、P 含量相互之间均无显著相关关系( $P > 0.05$ ),而 LM 处理下细根 C、N、P 含量相互之间均表现出显著相关关系( $P < 0.05$ ),覆盖年限的增长会使细根 C、N、P 含量之间表现出更复杂的显著相关关系,同时也会使单一元素与计量比之间表现出更多的显著相关关系,因此单一元素的含量变化更容易造成其他元素含量以及化学计量比的显著变化,这可能是长期覆盖之后雷竹细根养分容易失衡的原因。

3.2 覆盖年限对雷竹细根 C、N、P 含量动态的影响

细根养分涉及整个生态系统内养分的循环,C 是组成各类稳定营养物质的主体元素,为生理生化过程提供能量来源,N、P 元素是植物体内主要的限制性营养因子,同时是各类蛋白质与遗传物质的重要组成部分,微观层面上影响细根生理进程从而对植物的生长发育、群落组成乃至生态系统维持具有重要意义<sup>[20-23]</sup>。本研究中,CK 各季节细根 C 含量低于短期覆盖 SM 处理高于长期覆盖 LM 处理,细

根 N 含量和 P 含量与其具有相同规律,证明短期覆盖能增高细根养分含量,而长期覆盖反而会降低细根养分含量。有研究表明,地表增温覆盖对雷竹细根养分储量的增加产生一定积极作用,但随着覆盖年限增长,雷竹林地生产力退化,体内养分循环失衡,细根生产受到一定抑制,此时继续进行地表覆盖只会加剧细根的分解、凋落,细根养分储量降低<sup>[24]</sup>。有研究统计了众多细根养分研究结果得出中国植物细根的全 C 含量在 370.90~589.10 g/kg 之间;全 N 含量在 2.40~29.70 g/kg 之间;全 P 含量在 0.10~4.70 g/kg 之间<sup>[25]</sup>。本研究中雷竹细根的全 C 含量在 321.24~366.99 g/kg 之间;全 N 含量在 3.66~11.45 g/kg 之间;全 P 含量在 0.18~1.75 g/kg 之间,其中全 C 含量较前人研究偏低,这可能是由于前人统计的大量样本中用于细根 C 含量测定的样本量较少,且温带森林研究对象较多,而缺少亚热带森林特别是竹林的原因。覆盖之后的雷竹林细根全 C 含量春季较冬季升高,短期覆盖 SM 处理春季全 C 含量甚至达到全年最大值,这是因为覆盖改变了地下部分土壤温度,使根系生物生长物候期发生改变,雷竹根系在冬季提前萌动,此时地上部分生长需求不强,雷竹将营养分配至地下根系,因此雷竹根系生长旺盛,生物量增大,从而全 C 含量出现增加;长期覆盖 LM 处理全 N 含量年度变化和 CK 一致,而短期覆盖 SM 处理细根全 N 含量在春季出现增长,研究表明,植物根系所吸收的 N 大部分都运输到地上部分,参与各种蛋白质及酶的合成,仅有一小部分留给根部参与代谢<sup>[26]</sup>。短期覆盖全 N 含量在春季出现增长也与地下部分提前萌动根系对 N 吸收增强有关,而长期覆盖全 N 含量与 CK 变化一致的原因可能是长期覆盖之后雷竹林退化,土壤酸化导致根系生长受限,从而影响对 N 的吸收;细根 P 含量无论覆盖与否,变化趋势均一致,这说明根系对 P 的吸收受土壤条件影响不大,雷竹根系对 P 的吸

收可能有其特殊适应机制。

3.3 覆盖年限对雷竹细根 C、N、P 化学计量比动态的影响

雷竹林地覆盖作用原理是入冬前向竹林内施加适量的水分和肥料后使用发热保温有机材料覆盖地表,通过有机材料的增温保湿作用短期内增加雷竹的生理积温,从而打破笋芽休眠实现雷竹笋提前萌发。然而长期连续采用这种覆盖方式会使林地土壤物理特性变化、土壤酸化、土壤养分失衡、土壤微生物群落变化等,细根作为植物吸收养分和水分的重要器官,其对土壤环境变化的响应最为敏感,因此研究雷竹细根 C、N、P 化学计量特征对于认识覆盖经营措施下雷竹细根养分平衡变化有重要意义。

养分的化学计量特征会随着季节和物候生长期的更替而不断变化<sup>[27]</sup>,本研究中 3 种处理 C/N、C/P、N/P 均分别呈现出相同的季节变化规律。C/N 是衡量细根组织周转和分解的重要指标<sup>[28]</sup>。有研究表明,尽管细根寿命与其直径之间高度相关,但 C/N 也可解释细根寿命 20% 以上的变异,且表现为 C/N 越高,细根寿命越长<sup>[29]</sup>。本研究中 3 种处理雷竹细根全年平均 C/N 表现为:LM > CK > SM,长期覆盖使得雷竹细根 C/N 增高,即寿命增长,周转变慢,而短期覆盖使得雷竹细根 C/N 降低,即寿命缩短,周转迅速。在季节变化尺度上,C/N 可以反映根系碳氮代谢协调程度及各自库源的相对丰缺程度<sup>[30]</sup>。3 种处理雷竹细根 C/N 均呈现出相同季节变化规律,春夏两季高于秋冬,这是由于生长季地上部分生长旺盛消耗大量 N,从而分配到根系的 N 减少。CK 春夏季、LM 处理春夏秋冬季 C/N 均高于中国植物细根 C/N 平均值(59.15),SM 处理全年均低于该值,这说明 CK 和 LM 处理雷竹细根 N 含量的匮乏,其中长期覆盖不仅增大了春夏两季 C/N 也使冬季 C/N 增大,同样表现出 N 含量匮乏现象,这证明长期覆盖会加重雷竹细根的 N 缺乏。快速增长的组织(比如细根)会展示更低的 C:P、N:P,因为它们需要投入更多富 P 的 rRNA 来支持蛋白质的合成<sup>[31]</sup>。本研究中,覆盖之后雷竹细根各季节 C/P、N/P 均显著低于 CK( $P < 0.05$ ),证明覆盖能促进雷竹细根快速增长和周转。而从元素周转角度来看,细根 C/P、N/P 一定程度上能够反映出植物根系吸收土壤有效 P 的能力,比值越小说明植物细根吸收有效 P 的能力越强。C 含量的多少一般不会对植物的生长产生明显限制,而 N 和 P 含量的变化则会限制生态系统生产力,陆地生态系统中的植物

各器官适应各自生活环境而具有其相对恒定的 N/P,这一比值也是表征细根养分平衡的重要指标之一<sup>[32]</sup>。其受植物体内养分协调分配的影响,同时也受到环境中可用性 N 和 P 的限制,植物组织 N/P 能表征植物对 N 或 P 的相对缺乏程度<sup>[33]</sup>。Ko-erselam 和 Meuleman<sup>[34]</sup>通过对湿地植被施肥试验的研究表明,N/P < 14 可以认为是受 N 限制,N/P > 16 是受 P 限制。从 3 种处理全年平均值来看,CK N/P 远远大于 16,表明 CK 雷竹生长过程中主要受 P 的限制,长期覆盖 LM 处理 N/P < 14 表明 LM 处理雷竹生长过程中主要受 N 的限制,而短期覆盖 SM 处理没有表现出受 N、P 的限制。从季节动态来看,CK 4 个季节细根 N/P 均远远大于 16,各季节均表现出受 P 的限制;短期覆盖 SM 处理和长期覆盖 LM 处理在夏秋季细根 N/P 均小于 16,表现出受 N 限制,这可能是因为覆盖之后的雷竹在夏季抽枝换叶期和秋季行鞭期植物生长更为旺盛,消耗大量 N 素;在冬季 3 种处理 N/P 均大于 16,表现为受 P 限制,这可能是因为冬季笋芽分化期 P 素参与大量遗传物质合成,而 2 种覆盖处理 N/P 较 CK 小,说明覆盖减轻了细根在冬季的 P 限制;在春季长期覆盖 LM 处理细根表现出受 N 限制,而短期覆盖 SM 处理恢复养分平衡,这证明长期覆盖没有延续短期覆盖改善细根养分平衡的趋势。掌握生产经营中细根 N/P 阈值对于雷竹覆盖经营过程中匮乏营养的诊断具有至关重要的作用,但一方面特定立地条件下雷竹细根 N/P 阈值不定,且仅研究细根的 N/P 对于认知雷竹地下生态系统养分平衡具有局限性,因此还有待于进一步系统研究。

4 结 论

覆盖能够显著影响雷竹细根 C、N、P 含量及其化学计量比( $P < 0.05$ ),LM 并没有延续 SM 改善雷竹细根养分平衡的趋势,反而会降低雷竹细根养分含量且打破养分平衡,这表明长期覆盖已经不再对雷竹笋用林生长起正向作用,其可能已经对土壤环境产生负面效应继而影响雷竹细根对营养元素的吸收及周转,最终导致雷竹林地退化。雷竹笋用林的覆盖经营需降低连续覆盖时间,采取短期覆盖经营措施,给细根休养恢复的时间,从而达到雷竹笋用林可持续经营目的。本研究周期较短,不能代表更长时间尺度上雷竹细根养分变化规律,且仅研究了不同覆盖年限下雷竹细根 C、N、P 含量及其计量比的动态,而未对植物地上部分、凋落物及土壤此类指



标进行研究,这对于全面认识覆盖经营措施下雷竹植物体-凋落物-土壤层面 C、N、P 元素相互作用及平衡制约关系具有一定局限性,因此在未来延长时

间期限以及增加对叶片、凋落物、土壤等养分动态的研究,会更加有效地为雷竹笋用林覆盖经营提供新思路 and 理论依据。

参考文献:

[1] 张小全, 吴可红, DIETER MURACH. 树木细根生产与周转研究方法评述[J]. 生态学报, 2000, **20**(5): 875-883.  
ZHANG X Q, WU K H, MURACH D. A review of methods for fine-root production and turnover of trees[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(5): 875-883.

[2] IVERSEN C M, MCCORMACK M L, POWELL A S, *et al.* A global fine-root ecology database to address below-ground challenges in plant ecology[J]. *New Phytologist*, 2017, **215**(1): 15-26.

[3] ŚWIĄTEK B, CHODAK M, PIETRZYKOWSKI M. Estimation of fine root biomass of alders growing on technosols using two different methods[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2019, **50**(4): 474-481.

[4] NORBY R J, JACKSON R B. Root dynamics and global change: seeking an ecosystem perspective[J]. *New Phytologist*, 2000, **147**(1): 3-12.

[5] 邬畏, 何兴东, 周启星. 生态系统氮磷比化学计量特征研究进展[J]. 中国沙漠, 2010, **30**(2): 296-302.  
WU W, HE X D, ZHOU Q X. Review on N:P stoichiometry in eco-system[J]. *J. Desert Res.*, 2010, **30**(2): 296-302.

[6] ÅGREN G I, WETTERSTEDT J Å M, BILLBERGER M F K. Nutrient limitation on terrestrial plant growth - modeling the interaction between nitrogen and phosphorus [J]. *New Phytologist*, 2012, **194**(4): 953-960.

[7] REED S C, TOWNSEND A R, DAVIDSON E A, *et al.* Stoichiometric patterns in foliar nutrient resorption across multiple scales[J]. *New Phytologist*, 2012, **196**(1): 173-180.

[8] AI Z M, HE L R, XIN Q, *et al.* Slope aspect affects the non-structural carbohydrates and C : N : P stoichiometry of *Artemisia sacrorum* on the Loess Plateau in China[J]. *Catena*, 2017, **152**: 9-17.

[9] YANG Y, LIU B R, AN S S. Ecological stoichiometry in leaves, roots, litters and soil among different plant communities in a desertified region of Northern China [J]. *Catena*, 2018, **166**: 328-338.

[10] CHEN F S, NIKLAS K J, ZENG D H. Important foliar traits depend on species-grouping: analysis of a remnant temperate forest at the Keerqin Sandy Lands, China[J]. *Plant and Soil*, 2011, **340**(1-2): 337-345.

[11] 翟婉璐, 杨传宝, 张小平, 等. 林地覆盖经营对雷竹生物量及土壤肥力的影响[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(4): 1 147-1 155.  
ZHAI W L, YANG C B, ZHANG X P, *et al.* Effects of mulching management on biomass of *Phyllostachys praecox* and soil fertility[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(4): 1 147-1 155.

[12] 苏宇, 刘鸿, 李贤伟, 等. 施肥与覆盖处理对雷竹林土壤养分化学计量特征及肥料贡献率的影响[J]. 四川农业大学学报, 2018, **36**(6): 751-757, 784.  
SU Y, LIU H, LI X W, *et al.* Responses of soil stoichiometry characteristic and fertilizer contribution rate to intensive management in a *Phyllostachys praecox* forest[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2018, **36**(6): 751-757, 784.

[13] GUI R Y, WU W, ZHUANG S Y, *et al.* Intensive management increases soil acidification and phytotoxic Al content in *Phyllostachys praecox* stands in Southeast China[J]. *Journal of Sustainable Forestry*, 2018, **37**(1): 46-55.

[14] CHEN J H, LI S H, LIANG C F, *et al.* Response of microbial community structure and function to short-term biochar amendment in an intensively managed bamboo (*Phyllostachys praecox*) plantation soil: effect of particle size and addition rate[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 24-33.

[15] 陈珊, 陈双林, 郭子武. 林地覆盖经营对雷竹鞭根主要养分内循环的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(17): 5 788-5 796.  
CHEN S, CHEN S L, GUO Z W. Effects of mulching management on the internal cycling of nutrients in the rhizomatous roots of *Phyllostachys violascens*[J]. *Acta Ecol. Sin.*, 2015, **35**(17): 5 788-5 796.

[16] 家伟, 聂富育, 杨万勤, 等. 四川盆地西缘 4 种人工林土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 应用与环境生物学报, 2018, **24**(1): 112-118.  
JIA W, NIE F Y, YANG W Q, *et al.* Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen, and phosphorus within soil aggregates of four plantations in the Western edge of Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2018, **24**(1): 112-118.

[17] 汪其同, 高明宇, 刘梦玲, 等. 杨树根际土碳氮磷生态化学计量特征与根序的相关性[J]. 应用与环境生物学报, 2018, **24**(1): 119-124.  
WANG Q T, GAO M Y, LIU M L, *et al.* Correlation between ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus, and the root order in the rhizosphere soils of poplar plantations[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2018, **24**(1): 119-124.

[18] 张芸, 李惠通, 张辉, 等. 不同林龄杉木人工林土壤 C :

N : P 化学计量特征及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态学报, 2019, **39**(7): 2 520-2 531.

ZHANG Y, LI H T, ZHANG H, *et al.* Soil C : N : P stoichiometry and its relationship with the soil physicochemical properties of different aged Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(7): 2 520-2 531.

[19] 谢雨彤, 简保磊, 李贤伟, 等. 低效柏木林窗改造模式下香椿细根分解及其养分释放[J]. 应用与环境生物学报, 2018, **24**(3): 525-532.

XIE Y T, JIAN B L, LI X W, *et al.* Fine root decomposition and nutrient release in *Toona sinensis* plantation under the reconstruction mode of low-efficiency cypress forest gaps[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2018, **24**(3): 525-532.

[20] SOHRT J, HERSCHBACH C, WEILER M. Foliar P- but not N resorption efficiency depends on the P-concentration and the N : P ratio in trees of temperate forests[J]. *Trees*, 2018, **32**(5): 1 443-1 455.

[21] ELSEY J J, BRACKEN M E S, CLELAND E E, *et al.* Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2007, **10**(12): 1 135-1 142.

[22] 郭素娟, 谢明明, 张 丽, 等. 板栗细根碳、氮、磷化学计量时间变异特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, **24**(3): 825-832.

GUO S J, XIE M M, ZHANG L, *et al.* Temporal variation of C, N, P stoichiometric in fine roots of *Castanea mollissima*[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, **24**(3): 825-832.

[23] 苏 宇, 何 瑞, 尹海锋, 等. 开窗补植银木对柏木低效林分生态化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2019, **39**(2): 590-598.

SU Y, HE R, YIN H F, *et al.* Effects of *Cinnamomum septentrionale* in hilly area of central Sichuan basin on ecological stoichiometry characteristics of *Cupressus funebris* forest[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(2): 590-598.

[24] 刘亚迪. 植被退化雷竹林养分响应及其化学计量特征研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2012.

[25] 马玉珠, 钟全林, 靳冰洁, 等. 中国植物细根碳、氮、磷化学计量学的空间变化及其影响因子[J]. 植物生态学报, 2015, **39**(2): 159-166.

MA Y Z, ZHONG Q L, JIN B J, *et al.* Spatial changes and influencing factors of fine root carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of plants in China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, **39**(2): 159-166.

[26] CHAPIN F S, BLOOM A J, FIELD C B, *et al.* Plant responses to multiple environmental factors: physiological ecology provides tools for studying how interacting environmental resources control plant growth[J]. *BioScience*, 1987, **37**(1): 49-57.

[27] STERNER R W, ELSEY J J. Ecological Stoichiometry: the Biology of Elements from Molecules to the Biosphere[M]. New Jersey: Princeton University Press, 2002: 225-226.

[28] 王延平, 许 坛, 朱婉芮, 等. 杨树细根碳、氮含量的季节动态及代际差异[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(11): 3 268-3 276.

WANG Y P, XU T, ZHU W R, *et al.* Seasonal dynamics of carbon and nitrogen in fine roots and their differences between successive rotation poplar plantations[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(11): 3 268-3 276.

[29] MCCORMACK M L, ADAMS T S, SMITHWICK E A H, *et al.* Predicting fine root lifespan from plant functional traits in temperate trees[J]. *New Phytologist*, 2012, **195**(4): 823-831.

[30] 董 建. 林地覆盖措施对雷竹细根生物量及养分含量的影响[D]. 四川雅安:四川农业大学, 2011.

[31] 陈晓萍, 郭炳桥, 钟全林, 等. 武夷山不同海拔黄山松细根碳、氮、磷化学计量特征对土壤养分的适应[J]. 生态学报, 2018, **38**(1): 273-281.

CHEN X P, GUO B Q, ZHONG Q L, *et al.* Response of fine root carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry to soil nutrients in *Pinus taiwanensis* along an elevation gradient in the Wuyi Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(1): 273-281.

[32] FORDE B G. Local and long-range signaling pathways regulating plant responses to nitrate[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2002, **53**(1): 203-224.

[33] FOURQUREAN J W, ZIEMAN J C, POWELL G V N. Phosphorus limitation of primary production in Florida Bay: Evidence from C : N : P ratios of the dominant seagrass *Thalassia testudinum*[J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, **37**(1): 162-171.

[34] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N : P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 1996, **33**(6): 1 441.

(编辑:潘新社)